

## 2 鋼材料の構成則

### 2.1 繰り返し荷重下での応力-ひずみ関係のモデル化

塑性を考慮した応力-ひずみ関係には、周知のように、現在の応力状態および過去のひずみ履歴に基づいて応力増分（速度）とひずみ増分（速度）との間の関係として記述するひずみ増分理論と、同一のひずみ状態に対する応力状態が過去の履歴にはよらず一義的に表わされるとする全ひずみ理論とがある。本来、ひずみ増分理論の方が合理的であるが、単調荷重の下での応力-ひずみ挙動を表現するには全ひずみ理論に基づいても、大きな問題を生ずることがなく、かつ、過去の履歴によらないとする分だけ取り扱いが容易であるので、後者の理論が現実問題への応用の際に採用されることもしばしばである。

しかし、本報告で対象とするような動的荷重の下での挙動を扱う場合には、両者の理論により得られる結果には大きく差異が生ずることになる。したがって、ここでは、より合理的なひずみ増分理論に基づくモデル化について述べる。

弾塑性材料の応力-ひずみ関係は、基本的には次に示す三つの特性によって特徴付けられる<sup>1)</sup>。すなわち、

1. 初期降伏規準（応力）
2. 塑性流れ則
3. ひずみ硬化則

である。

繰り返し荷重下での応力-ひずみ関係は、さらに、

- ・ 繰り返し荷重に伴う繰り返し軟化（あるいは硬化）の影響、および
- ・ 荷重方向を逆転した際に生ずる、後続降伏応力の初期降伏応力からの低下を示す、いわゆるBaushinger効果

とを考慮しなければならない。

鋼材の場合には、大別して、高張力鋼と軟鋼とで、以上の特性が相違する。高張力鋼の場合には明瞭な初期降伏点は生じないのに対して、軟鋼の場合には明瞭な初期降伏点とそれに続く降伏棚とが存在する。軟鋼においてもその後の荷重の繰り返しのに伴ない降伏棚は消滅し、高張力鋼の場合と同様に滑らかな応力-ひずみ関係に移行する。したがって、この初期における挙動の相違を除くと、応力-ひずみ関係のモデル化の立場から見た両鋼材の特性は同一である。ただし、地震時においては、降伏棚域での応力の繰り返しの下で局部座屈が生じるような状況も十分考慮に入れる必要があり、そのような場合には、降伏棚域での繰り返し弾塑性応力-ひずみ関係をいかに精度良くモデル化できるかが得られる結果に重要な影響を及ぼすことになる。

通常、塑性化の規準となる降伏規準には偏差応力の二次の不変量で記述されるいわゆるVonMises型のJ2規準が用いられる。

なお、地震時のひずみ速度が強度に及ぼす影響については2.2.3において述べるが、その他の影響については、ひずみ速度の影響を考慮した鋼材の履歴応力ひずみ関係に関する実験データがほとんど得られていないことでもあり、少なくとも断面力段階での挙動に関してはほとんど無視できるものとして、ここでは取り上げないものとする。

### 2.1.1 塑性域に至る繰り返し荷重下での鋼材の応力-ひずみ関係の特徴

既に述べたように、降伏規準はJ2規準を用いて表わすことができる。塑性流れ則には関連流れ則と非関連流れ則とがあるが、金属の場合、通常、関連流れ則に従うとしても応力-ひずみ関係を概ね十分精度よく表現することができる。塑性域に入った後のひずみ硬化あるいは軟化については、大別して移動硬化と等方硬化の二つの理論があるが、繰り返し荷重下では、一般には両者の特徴を混合した複合硬化則で表わされるような挙動を示すのが特徴である。

### 2.1.2 修正多曲面モデルによる一軸応力状態の履歴応力-ひずみ関係

以上に述べたような特徴を記述する代表的なモデルに、降伏曲面の他に境界曲面を用いる二曲面モデル（あるいは境界曲面モデル；図2.1.1, 2.1.2参照）<sup>2)</sup> -<sup>4)</sup> とさらに中間曲面を導入した多曲面モデル（図2.1.3）<sup>5)</sup> とがある。ここでは、多曲面モデルを修正した修正多曲面モデル<sup>6)</sup> を取り上げ、まず、一軸応力状態での履歴応力-ひずみ関係を記述する。

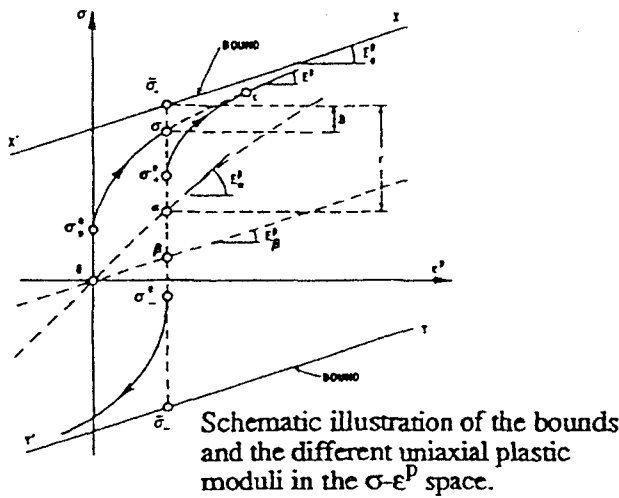


図2.1.1 一軸応力場の境界曲面モデル<sup>3)</sup>

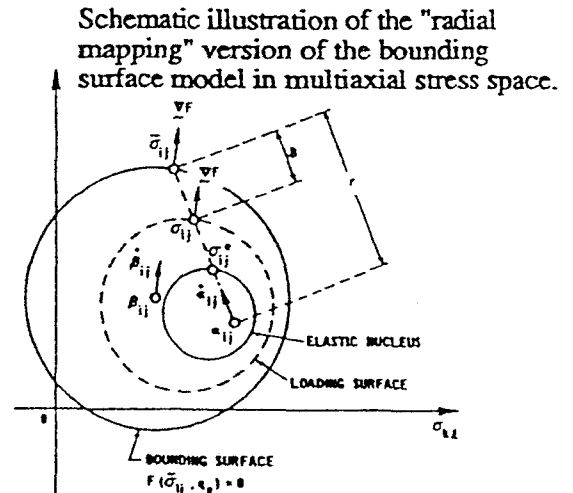


図2.1.2 多軸応力場の境界曲面モデル<sup>3)</sup>

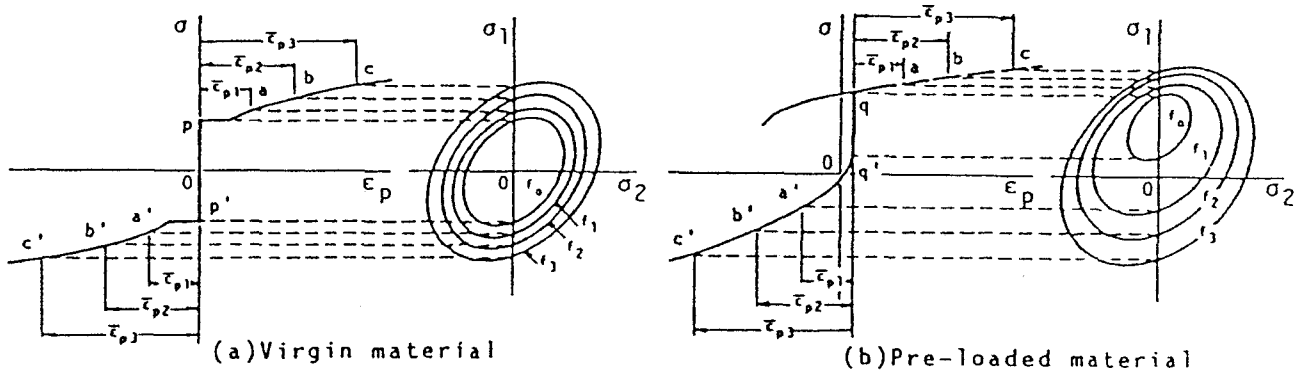
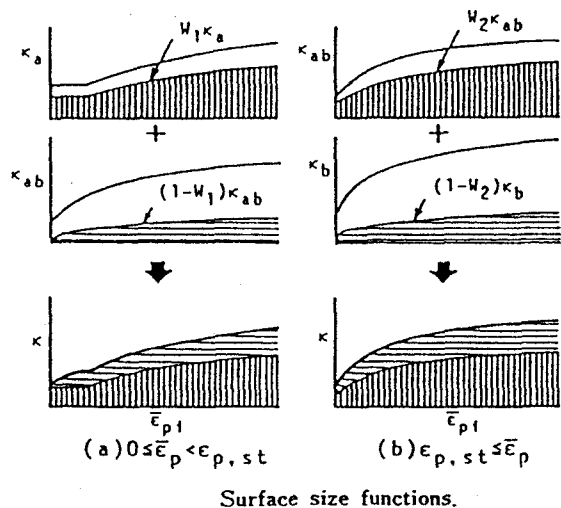


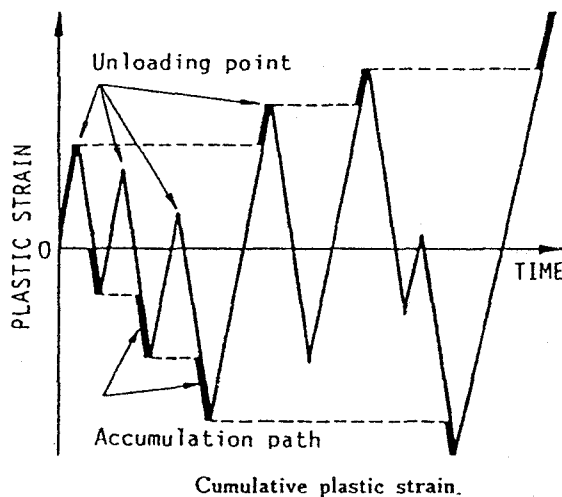
図2.1.3 一軸応力場および多軸応力場の多曲面モデル<sup>5)</sup> (a) 処女材 (b) 履歴材

修正多曲面モデルを単純化して記述すると、履歴状態の応力-ひずみ関係が、累積相当塑性ひずみをパラメータとして、その値が零のときの処女材の応力-ひずみ関係より、パラメータの値が十分大きくなった最終的な定常状態でのそれに移行する移動硬化の過程（重み関数により表現）と、初期降伏以降の後続降伏曲面の拡大あるいは縮小を上記パラメータが一定の時の応力-ひずみ曲線（基本形状関数）により表現する等方硬化の過程とを混合した、複合硬化モデルと言える（図2.1.4）。



Surface size functions.

図2.1.4 修正多曲面モデルの形状関数  $\kappa$  <sup>6)</sup>

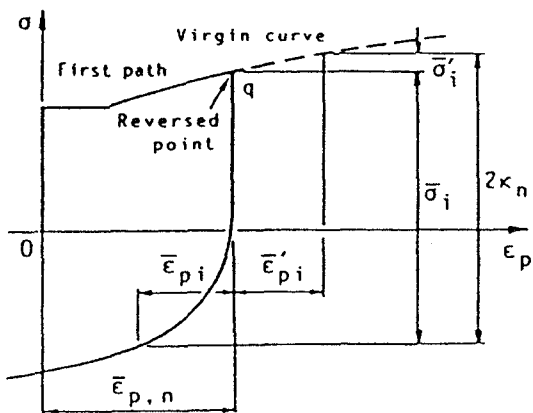


Cumulative plastic strain.

図2.1.5 累積相当塑性ひずみ <sup>6)</sup>

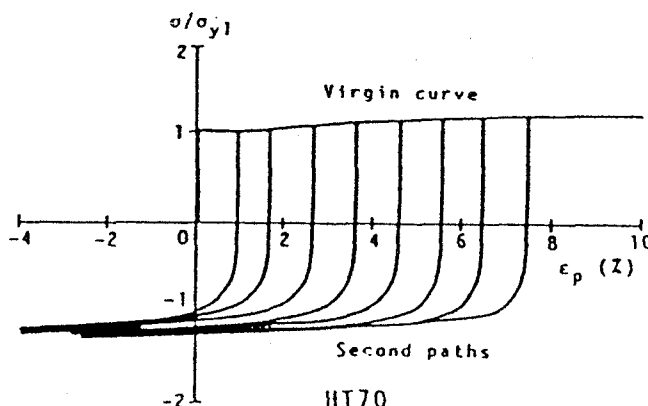
一軸応力状態の場合には、累積相当塑性ひずみは図2.1.5 に太線で示すような、それまでの最大応力を超える応力に対して生ずる塑性ひずみ（絶対値）を引張側と圧縮側とでそれぞれ累積したものの和である。

問題は、各パラメータの値に対して、上記応力-ひずみ曲線をどのように決定するかということであるが、文献 [6] によれば、一つの単調載荷試験と単調載荷の後の唯一回の除荷試験を幾つかの除荷応力の下で行なえば、後は単純な補間によって一義的に容易に定め得る（図2.1.6, 2.1.7）。この際に、軟鋼が対象であれば、降伏棚領域で除荷を行なう試験を適宜行なえば、補間の精度を上げることができる。



Estimation of surface size function.

図2.1.6 形状関数の定義 <sup>6)</sup>



Experimental stress-plastic strain relations for estimating material property parameters.

図2.1.7 材料定数決定のための一連の単一除荷試験 <sup>6)</sup>

基本形状関数と重み関数の具体的な例を図2.1.8および2.1.9に、また、シミュレーションの結果を実測値と比較したものを図2.1.10に示す<sup>7)</sup>

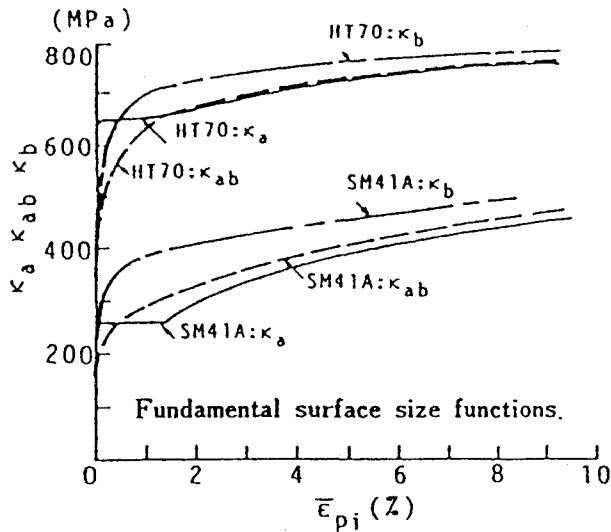


図2.1.8 基本形状関数の具体的な例<sup>6)</sup>

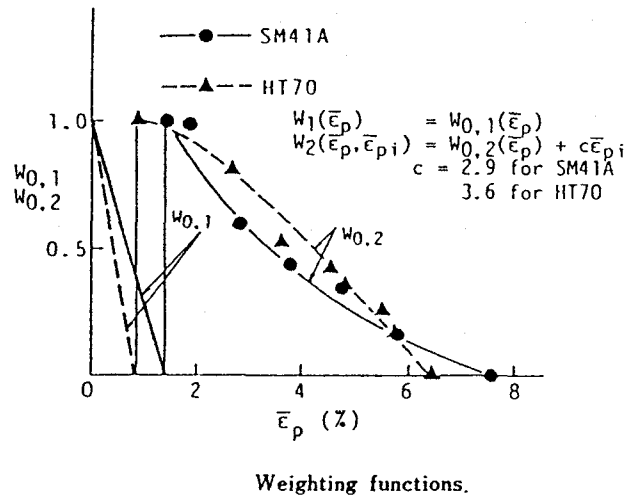
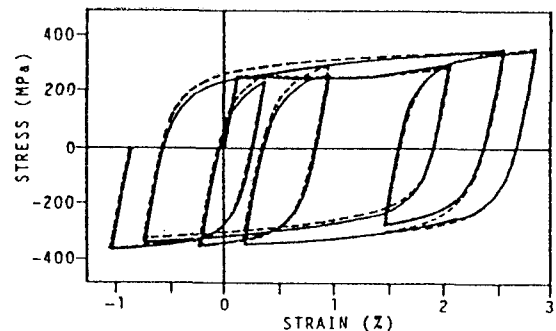
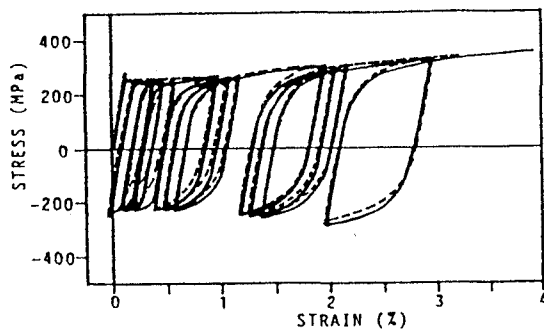


図2.1.9 重み関数の具体的な例<sup>6)</sup>



----- Experiment

———— Calculation

Comparisons of stress-strain relations; experiments and calculations (SM41A).

図2.1.10 履歴応力-ひずみ関係のシミュレーション例<sup>7)</sup>

### 2.1.3 多軸応力場における履歴応力-ひずみ関係モデル

多軸応力下であっても载荷および除荷、さらなる再载荷経路が全て応力-ひずみ関係の原点あるいは降伏曲面の原点を經由するほぼ比例载荷に近い载荷であれば、一軸応力状態の議論における応力と塑性ひずみを、それぞれ相当応力と相当塑性ひずみに置き直すことにより、そのまま理論を拡張することが可能である。しかし、一般には、塑性ひずみの局所的な発生により応力の再配分が行なわれ、上記のような比例負荷が成り立たなくなったり、荷重そのものが非比例負荷であったりする。一軸応力状態の場合には、引張応力と圧

縮応力とでは明瞭にその方向が反転し、符号が逆転するが、多軸応力状態の応力の大きさを表わす相当応力は常に正であり、一軸応力状態の場合のような符号の反転がありえないので、図2.1.5に示す累積相当塑性ひずみの定義はあてはまらなくなる。

多軸応力状態を対象とする研究も数多く行われているが、モデルの検証は一軸応力状態あるいは一軸応力状態に準じる応力状態を対象とするものがほとんどであり、いずれも確立した理論として認められる段階には至っていない。

このような径路依存性に対する取り扱い方法の確立は今後の研究課題である。

#### 2.1.4 鋼部材の弾塑性履歴挙動推定への多曲面モデルの適用例

以上に、材料そのものを対象とする、履歴応力-ひずみ関係の現状における代表的なモデル化について述べた。構造物は数多くの構造部材から構成されるのであるから、繰り返し荷重下での構造物の挙動を追跡するためには、個々の構造部材の挙動を追跡し、その総合的な結果として、構造物全体としての挙動を把握しなければならない。しかし、個々の部材の挙動を上記の材料段階のモデル化に基づいて追跡しようとするれば、全体系の挙動の解析には膨大な計算量を要することになる。したがって、一つの帰結として、断面力（一般化応力）-一般化ひずみの段階で、前項までと同様の考え方に基づく履歴一般化応力-ひずみ関係を把握することが要求される。この際には、荷重形式（断面力の組み合わせ）が結果に大きく影響することが予測される。皆川ら<sup>8)</sup>は、純曲げの限定された荷重に対して、このような一般化された応力-ひずみ関係を材料段階の構成則に基づいて解析的に求め、実測結果との比較を通じて、その有効性を確認している。

#### 参考文献

- 1) 倉西茂編：材料特性の数理モデル入門～構成則主要用語解説集～第5章弾塑性体、構造工学シリーズ4、土木学会、pp.40-65、1989年
- 2) DAFALIAS, Y.F. and POPOV, E.P.: A model of nonlinearly hardening materials for complex loading, *Acta Mech.*, Vol.21, pp.173-192, 1975.
- 3) DAFALIAS, Y.F. : Bounding surface plasticity I; Mathematical foundation and hypoplasticity, *Proc. of ASCE, J. Eng. Mech.*, Vol.112, pp.966-987, 1986.
- 4) SHEN, C., MIZUNO, E. and USAMI, T.: Development of a Cyclic Two-Surface Model for Structural Steels with Yield Plateau, NUCE Research Report, No.9302, Dept. of Civil Eng., Nagoya University, March, 1993.
- 5) PETERSSON, H. and POPOV, E. P.: Constitutive relation for generalized loadings, *Proc. of ASCE, Vol.104, No.EM4*, pp.611-627, 1977.
- 6) MINAGAWA, M., NISHIWAKI, T. and MASUDA, N.: Modelling cyclic plasticity of structural steels, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.4, No.2. pp.361s-370s, Oct., 1987.
- 7) 皆川勝：構造用鋼材の弾塑性履歴挙動のモデル化とそれの構造部材への応用、武蔵工業大学学位論文、1988年3月。
- 8) 皆川勝・西脇威夫・増田陳紀：鋼はりの履歴曲げモーメント-曲率関係の推定、構造工学論文集、Vol. 34A、pp. 111-120、1988年3月。

## 2. 2 鋼構造物の耐震性を考慮した鋼材

鋼構造物の耐震性に関して、それを材料すなわち構造用鋼材面からみると、その機械的性質（降伏点・引張強さ・一様伸びなど）が大きく関与する。もちろん溶接性、破壊靱性、内部品質なども大いに係わりがあるが、ここでは構造設計の観点から機械的性質に絞って考える。

現在の構造用鋼の主流は40キロ鋼・50キロ鋼であるが、60キロ鋼・80キロ鋼も部分的には以前から使われている。図2.2.1に高炉材のそれらの応力-ひずみ線図を、表2.2.1に機械的性質を示す。これらからも判るように、一般的に引張強さが上がると降伏点も上がり、降伏比（引張強さに対する降伏点\*の比）も高くなる。そして一様伸び（最大引張荷重に対応する永久伸び）は小さくなる。

（\*降伏点が明瞭でない材料ではその代わりに0.2%の永久伸びが生じるときの応力値-0.2%耐力-を用いる。）

最近の耐震設計が弾塑性設計・エネルギー吸収設計の概念をも採り入れようとする方向にあることからいくと、構造用鋼材の機械的性質においても弾性域のみならず降伏点以降の力学的挙動、すなわち降伏点・降伏比・引張強さ・一様伸びなどが重要になってくる。これらを制御した新しい鋼材、すなわち鋼構造物の耐震性を考慮した鋼材として、低降伏比高張力鋼や降伏点のバラツキ幅を制御した鋼が開発されてきた。以下これらについて述べ、最後に地震時のひずみ速度が鋼材の引張強さに及ぼす影響について紹介する。

### 2.2.1 鋼材の降伏比が耐震性に及ぼす影響と低降伏比高張力鋼

弾性設計においては、構造設計に用いられる鋼材の強度は降伏点を基準に定められている。したがって降伏点が高い鋼材を使えば基本的には構造物の軽量化が可能となる。一方、我が国のような地震国では構造物の地震に対する安全性を確保する事が重要である。耐震安全性が重要となる構造物ではその塑性変形能力も大きな設計因子となって来る。鋼構造物の塑性変形能力を確保するにはその構造計画に負うところが大きい、材料として

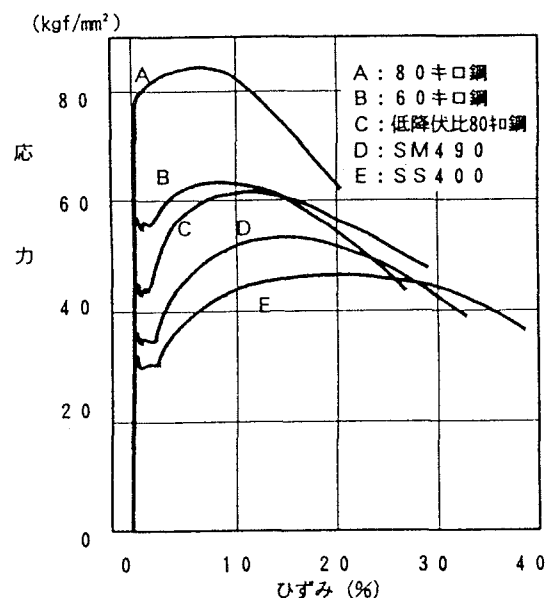


図 2.2.1 構造用鋼材の応力-ひずみ線図の例

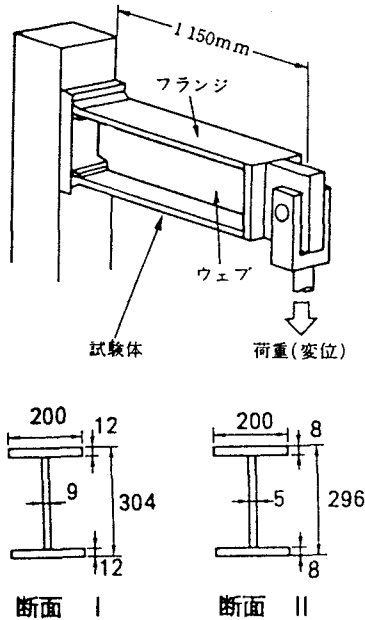
	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	降伏比 %	一様伸び %
SS400	32.0	46.4	69.0	22
SM490	36.1	53.7	67.2	16
60キロ鋼	56.5	63.7	88.7	9
80キロ鋼	78.8	84.3	93.5	7
低降伏比60キロ鋼	45.2	61.9	73.0	12

80キロ鋼の降伏点は0.2%耐力値

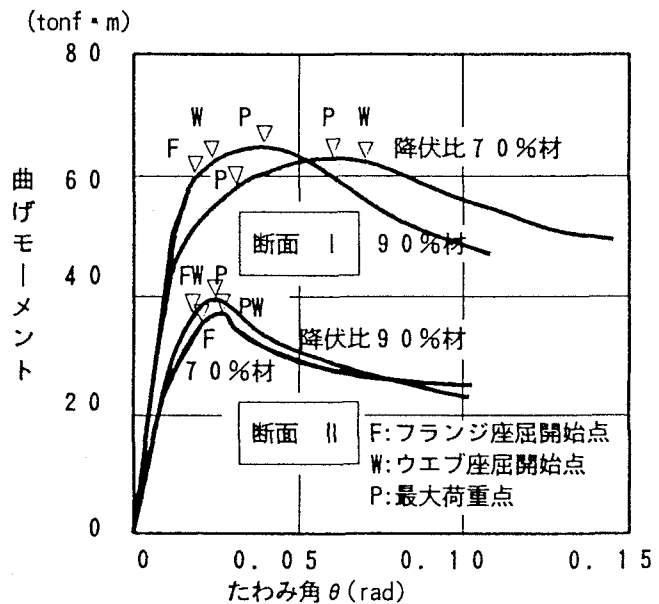
表 2.2.1 構造用鋼材の機械的性質の例

の鋼材の降伏比をある程度低く抑えておくことも重要である。

図2.2.2(a)に示すような片持梁で鋼材の降伏比が部材の塑性変形能力に及ぼす影響をみてる。同図(b)の断面Iの曲線は幅厚比の小さな断面に関するもので、降伏比の高い(90%)鋼材からなる片持梁と降伏比の低い(70%)鋼材からなる片持梁についての載荷試験結果を、曲げモーメントMとたわみ角 $\theta$ の関係で整理したものである。その特徴は次のようである。①塑性変形の初期は降伏比90%材の方が降伏点が大いいため、同じ



(a) 試験装置



(b) 試験結果

図 2.2.2 低降伏比60キロ鋼からなる部材の挙動

$\theta$  に対するMの値が大きいが、②変形が大きくなり最大荷重を呈した後は降伏比90%材の方が降伏比70%材のものに比べMの低下傾向が著しく、Mの大小関係が逆転している。③また最高荷重点までの変形量は一樣伸びの大きい降伏比70%材の方が大きくなっている。このように低降伏比鋼を用いた部材の方が、部材降伏後におおきな塑性変形能力を発揮することがわかる。

鋼材は引張強さの上昇に伴って降伏比が高くなる傾向がある。これが高張力鋼ほど塑性変形能力に乏しいと言われる所以である。高張力鋼のメリットを活かし、かつ耐震性向上を図るためには降伏比を抑えた低降伏比高張力鋼が必要となる。図2.2.3に40キロ級の鋼から80キロ級の鋼までの降伏比と引張強さ

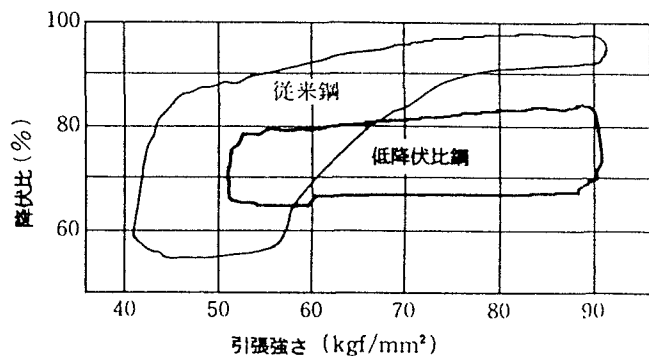


図 2.2.3 鋼材の引張強さと降伏比の相関

の相関の分布状況を示す。高炉材では40キロ鋼、50キロ鋼の降伏比は通常70%代またはそれ以下であり耐震設計上十分に低い値である。しかし60キロ鋼、80キロ鋼の降伏比となると80%、90%を越える。鋼材の降伏比が大きくなると部材の塑性変形能力が小さくなることは上に述べた。そこで降伏点を低く抑えた低降伏比高張力鋼が開発された。現在60キロ鋼で80%以下、80キロ鋼で85%以下の降伏比を有する鋼材の生産が可能である。その代表例として前掲の図2.2.1に通常の60キロ鋼と低降伏比60キロ鋼の応力-ひずみ線図を示す。低降伏比化することで鋼材の一樣伸びが大きくなり、また最大引張荷重以降の伸び性状も改善されることがわかる。構造物の塑性変形能力を高めるには鋼材の低降伏比化とともに、その一樣伸びが大きいことも大切である。

薄肉鋼構造部材の終局挙動は局部座屈に支配されることが多い。局部座屈が支配的となる幅厚比の比較的大きいところでは低降伏比鋼の効果は認められないことに注意しなければならない。図2.2.2の断面Ⅱは幅厚比の比較的大きい断面の片持梁の載荷試験結果を示すものである。同図(b)から、部材降伏後まもなくフランジおよびウェブがほぼ同時に座屈し、その直後に最大荷重を迎え以後急な耐力低下をきたすことがわかる。降伏比90%材の挙動と比し降伏比70%の低降伏比鋼の効果は認められない。

### 2.2.2 降伏点のばらつき幅を制御した鋼

JISでは構造用鋼材の引張強さには上、下限値が設定されているが、降伏点には下限値が規定されているのみで、その上限値規制はない。実際、鋼材の降伏点は大きくばらついている。SM490の鋼板の降伏点分布の例を図2.2.4に示す。これはある高炉メーカーが、注文された種々の板厚の鋼板を、規格を満足する範囲内で適正な条件により製造した結果である。板厚が薄くなると降伏点の平均値も上昇し、かつばらつき幅も大きくなる。一般的には変動係数で10%はあると言われている。

構造物を耐震設計する場合、降伏点のばらつきが大きいと終局挙動が設計者の意図したものとかげ離れたものとなる場合がある。いま図2.2.5に示す3層ラーメンを考えてみる。設計者は梁降伏先行型崩壊メカニズムで、構造系全体の塑性変形能力が高く耐震的に優れた構造設計を意図する。

(図中の骨組A)ところが鋼材の降伏点のばらつきが大きい場合、柱降伏が先行し図中の骨組Bのような脆い崩壊メカニズムが

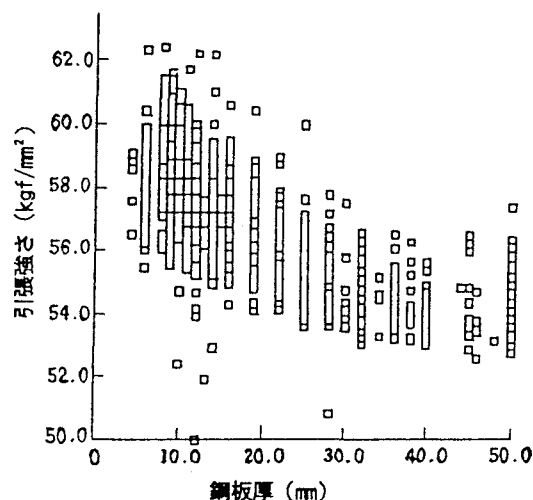


図 2.2.4 SM490の鋼板の降伏点分布

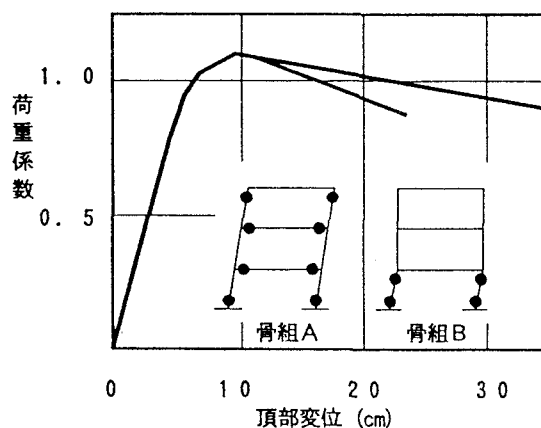


図 2.2.5 骨組の静的崩壊機構と荷重変形曲線



生じる場合がある。これを抑えるには柱梁耐力比を鋼材のばらつきをカバーすべく大きくしておく必要があり、このため柱の設計断面も大きくなる。しかし降伏点のばらつきを小さく抑えれば所要柱梁耐力比も小さく設計出来るので構造物の経済設計が可能となる。

構造物の地震時の終局挙動に及ぼす不確定要因としてこの他、残留応力・形状初期不整・地震動特性のばらつき・構造物の重量分布のばらつきなどがある。これらの中で降伏点のばらつきは大きな影響を及ぼす要因の一つであり、これを小さく抑えることは構造物の耐震性を高める上で重要である。高炉メーカーにおいては鋼材の製造上、降伏点を支配する因子についてはすでに充分解明しており降伏点のある範囲で制御することは可能である。現状、40キロ鋼・50キロ鋼について、求められる板厚を通して、 $8 \text{ kgf/mm}^2$  のばらつき幅での制御が技術的に可能となっている。

### 2.2.3 載荷ひずみ速度が鋼材の引張強さに及ぼす影響

地震による荷重は通常の静的引張試験に比べてかなり速い速度で構造物に作用する。静的引張試験のひずみ速度が $10^{-4}/\text{SEC}$ 程度であるのに対し、地震時の構造部材のひずみ速度はおよそ $10^{-1}/\text{SEC}$ 程度である。静的引張試験で引張強さ・降伏点が所要値を満足したとしても、地震時の高速負荷でそれらの特性が確保できるかは問題となる。図2.2.6に構造用鋼材の引張試験のひずみ速度を変えたときの引張強さ・降伏点の測定結果の一例を示す。ひずみ速度が大きくなるにつれて引張強さ・降伏点はいずれも上昇し、地震時の鋼材強度は静的引張試験での値の10%程度高くなっている。

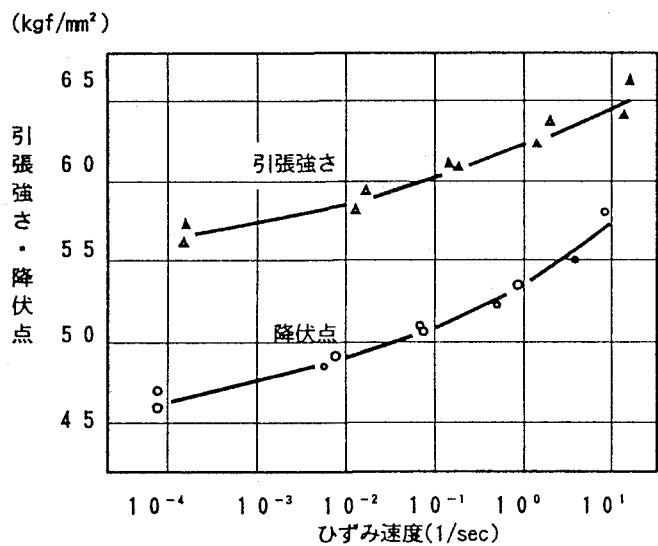


図 2.2.6 鋼材のひずみ速度と引張強さ・降伏点

#### 参考文献

- 1) 大橋 守ら (1989) 建築用新厚鋼板の開発 製鉄研究 第334号
- 2) 豊田政男ら (1990) 骨組溶接構造体の変形能に及ぼす鋼材変形特性の影響 溶接学会論文集 第8巻第1号
- 3) 岡松真之ら (1993) 建築構造用鋼材の知識 鋼構造出版 第7章